

**Áramlás által keltett zaj numerikus szimulációja**  
**Paál György**  
**OTKA zárójelentés (T46304)**

A projekt alatt végzett munka túlnyomó részben az élhang (edge tone) konfigurációra koncentrált. Az utolsó évben elkezdtünk dolgozni egy újabb konfiguráción, az üreghangon (cavity tone) is, de ez a munka még kezdeti stádiumban van. A munka során eddig összesen 1 impact faktoros folyóiratszót és 8 konferenciát publikáltunk, amiből 7 nemzetközi, 1 magyar nyelvű konferencián jelent meg. A még fel nem dolgozott eredményekből terveink szerint még legalább további két rangos folyóiratszót írunk.

A projekt folyamán sikeres DAAD-MÖB kétoldalú kooperációt bonyolítottunk le a Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg áramlástan tanszékével. Ez a kapcsolat azóta is fennmaradt, ha nem is formális keretek között.

A kutatás három fő területen zajlott: kísérletezés (csak áramlástan), áramlástan szimuláció és akusztikai szimuláció.

Az élhang egy sík szabadsugárból és azzal szemben elhelyezett ékből áll. Ezt az éket nevezik „él”-nek is angolul „edge”. Bizonyos paramétertartományban a szabadsugar szabályos lengéseket végez az ék körül. Ennek a frekvenciája az

$$f = C \frac{v}{h^n} \quad (1)$$

egyenletnek engedelmeskedik, ahol  $v$  a kiömlés átlagsebessége,  $h$  a fúvóka-ék távolság és  $C$  konstans. Ez az összefüggés egy-egy paramétertartományban változatlan formában érvényes, de bizonyos  $h$  vagy  $v$  értékeknél ugrásszerű változás következik be a frekvenciában és ott  $C$  értéke megváltozik. Ezeket a tartományokat nevezzük hidrodinamikai módusoknak. Különböző hidrodinamikai módusok esetén a szabadsugar formája is más; a módus rendje nagyjából a fúvóka és ék közötti félhullámok számát jelzi. Egy vitatott mennyiség az irodalomban az  $n$  kitevő értéke; 1 és 1,5 között változik.

Mind kísérletileg, mind szimulációval meggyőzően demonstráltuk, hogy  $n$  értéke 1.

Az élhang konfiguráció hangot is kibocsát; az elmélet szerint tökéletes dipólus iránykarakterisztikával. Ezt is sikerült reprodukálnunk az akusztikai szimulációk segítségével.

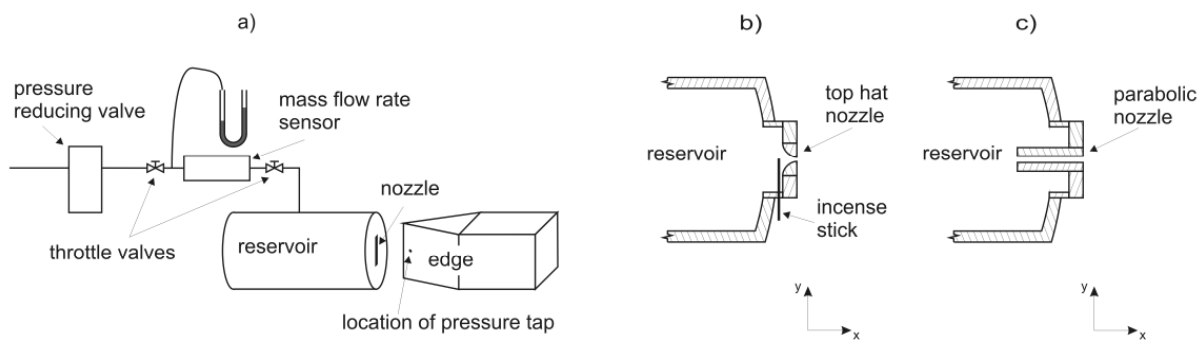
## **1. Kísérletek**

Felépítettünk, leteszteltünk egy élhang-modellező kísérleti berendezést, amin áramlás-vizualizációt illetve térfogatáram- és instacionárius nyomásméréseket lehet végezni. Számos technikai nehézség leküzdése után jó minőségű méréseket végeztünk. A mérések célja az élhang lengési frekvenciájából számított Strouhal szám meghatározása a Reynolds szám függvényében, és annak összehasonlítása a szimulációs eredményekkel. Az irodalomból is, és saját szimulációinkból is ismeretes, hogy a rendszer viselkedése igen erősen függ a kiömlő sebességprofilról. Ezért a kísérleti berendezést egyenes („top hat”) sebességprofillal is, és parabolikus sebességprofillal is tudjuk üzemeltetni.

A kísérleti berendezést az első ábrán láthatjuk.

A mérőberendezés részletes leírása Vaik and Paál (2008) – ban található. Itt csak egy rövidebb összefoglalót közlünk.

0,5 bar-ra csökkentett nyomású sűrített levegőt vezettünk rugalmas csöveken keresztül egy hengeres, 57 l-e tartályba. Egy hőelemes elven működő, feszültségjelet szolgáltató tömegáramszenzort építettünk a vezetékbe, hogy indirekte az áramlás sebességét mérjük. A szenzort két fojtószelep közé építettük, mert a kalibrálás során észrevettük, hogy a jel érzékeny a helyi nyomásra.



1. ábra a) A mérőrendszer vázlata;; b) Az egyenletes sebességprofilú fúvóka részletei; c) A parabolikus sebességprofilú fúvóka részletei

Két különböző fúvókát készítettünk, hogy a két különböző sebességprofil elő tudjuk állítani.

A fúvókéval szembe egy simára köszörült 30°-os éket helyeztünk. Az ék mind a z, mind az x irányokban hosszabb volt, mint az irodalomból megszokott. A fúvóka-ék távolság állítható volt. Az ékbe, 26,2 mm-re a csúcstól nyomás távadót helyeztünk. Ennek a távadónak a mérési tartománya [-100 Pa; 100 Pa] és az ehhez tartozó output [1 V; 6 V]. Egy speciális házi készítésű erősítő segítségével ezt a feszültségtartományt a valóságban előforduló  $\pm 10$  Pa tartományra képeztük le. Az egyenletes sebességprofil esetén vizualizációkat készítettünk egy, a fúvóka konfúzor részébe dugott füstölő és egy nagysebességű digitális kamera segítségével. A parabolikus esetben nem végeztünk vizualizációkat.

Mindkét mérőműszert igen gondosan kalibráltuk, aminek részleteit itt nem közöljük.

Első lépésként különböző mérési módszerekkel mért lengési frekvenciákat hasonlítottunk össze.

A következő módszereket alkalmaztuk:

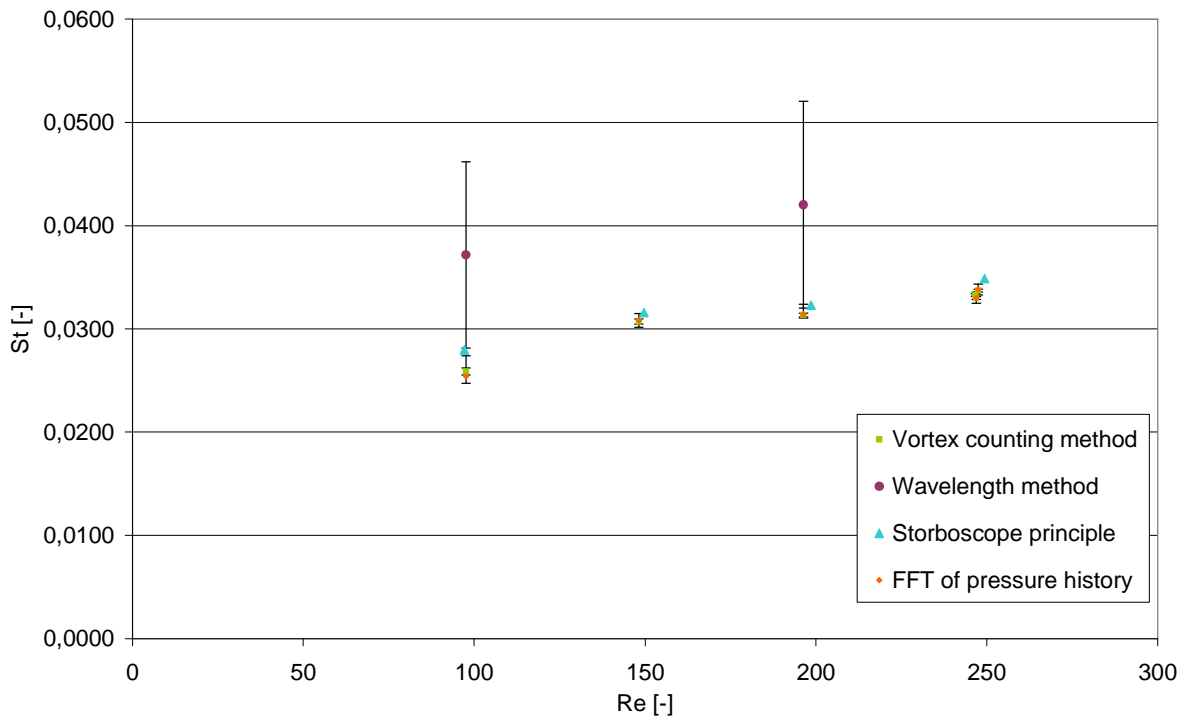
- Az ékbe épített nyomásszenzor időjelét Fourier-transzformálva kapjuk a frekvenciát;
- A tér egy fix pontján két egymás közötti örvény elhaladásának idejét mérjük vizualizáció segítségével;
- Szintén vizualizáció segítségével az instabilitási hullám hosszát, valamint a hullám terjedési sebességét becsüljük, és ebből számítjuk a frekvenciát;
- Stroboszkóppal világítjuk meg a rendszert – ez csak alacsony frekvenciáknál alkalmazható.

A négy módszer közül a legpontatlanabb a c) módszer. Ennek oka az, hogy állandó hullámterjedési sebességet és állandó hullámhosszot feltételezünk a távolság mentén, ami, ahogyan a szimulációk is bizonyították, nem igaz.

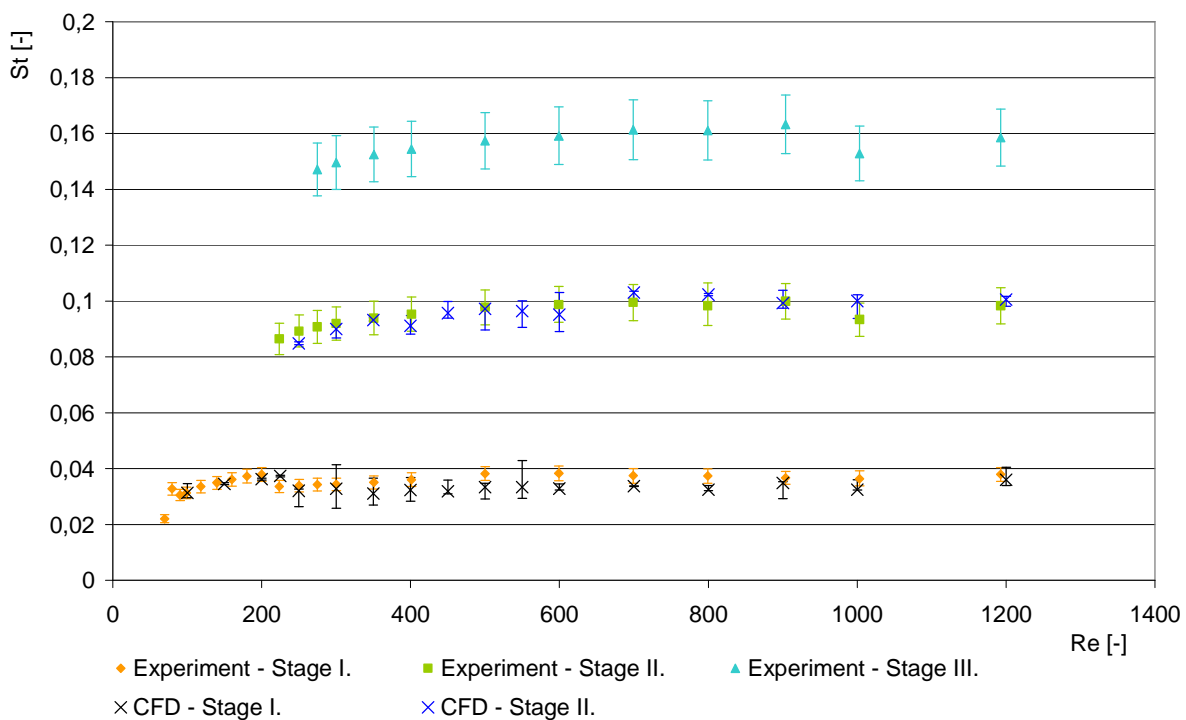
A 2. ábra mutatja az összehasonlítást az első módusra. Látható, hogy minden mérés által szolgáltatott eredmény jól egyezik, kivéve a c) módszert, de ott is a hibahatáron belül maradtak a többi módszerrel kapott eredmények. Hasonló jó egyezést kapunk a második módus esetében is. A projekt további részében a frekvencia meghatározására az a) módszert alkalmaztuk, gyorsasága, egyszerűsége és megbízhatósága miatt.

A következő ábrán (3. ábra) a mérések és a szimulációk összehasonlítása látható. Először a fúvóka-ék távolságot állandó értéken tartottuk ( $h/\delta = 10$ , ahol  $\delta$  a résszélesség) és a sebességet változtattuk. Mindkét változót dimenziótlanítottuk, tehát a Strouhal számot ábrázoltuk a Reynolds szám függvényében.

Először az egyenletes sebességprofillal szerzett eredményeket láthatjuk. Az egyezés kitűnő. Egyrészt, a konkrét numerikus értékek mindenhol a hibahatáron belül egyeznek, és minden móduson belül nagyjából konstans Strouhal számot mutatnak.



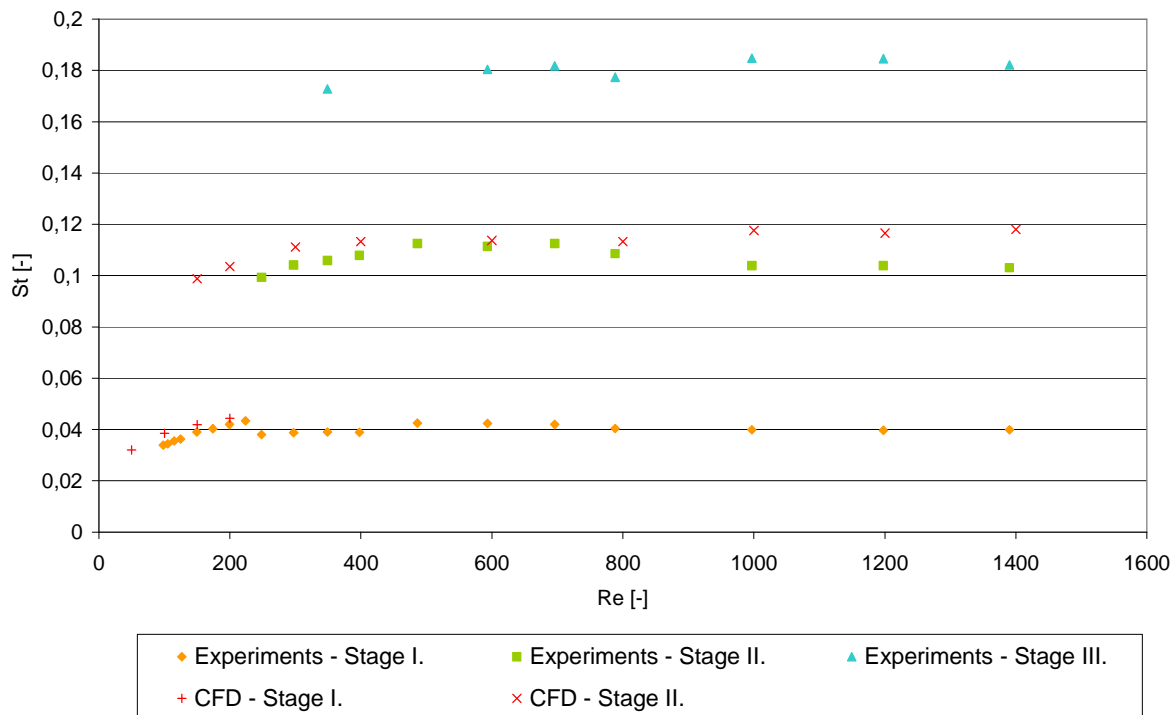
2. ábra: A különböző frekvenciamérési módszerek összehasonlítása



3. ábra: Mérések és szimulációk összehasonlítása. Egyenletes sebességprofil,  $h/\delta = 10$

Másrészt az első két módus megjelenése nagyon hasonló Reynolds számnál történik mindkét esetben. A harmadik módus megjelenésében különbség van; a kísérleteknél sokkal alacsonyabb Reynolds számnál történik, úgy, hogy a szimulációs eredmények az ábra tartományán kívül esnek.

Harmadrészt sikerült az egyenletes sebességprofilú élhagnak azt a tulajdonságát reprodukálnunk, hogy magasabb módusok megjelenése után az alacsonyabb módus csaknem változatlan amplitúdóval fennmarad, és a két, vagy magasabb Reynolds számnál három módus egyidejűleg létezik. Negyedrészt mind a szimulációknál, mind a méréseknél látható, hogy az első módus Strouhal számában némi visszaesés tapasztalható, amikor a második módus megjelenik. Ez valószínűleg a két módus kölcsönhatásával függ össze.



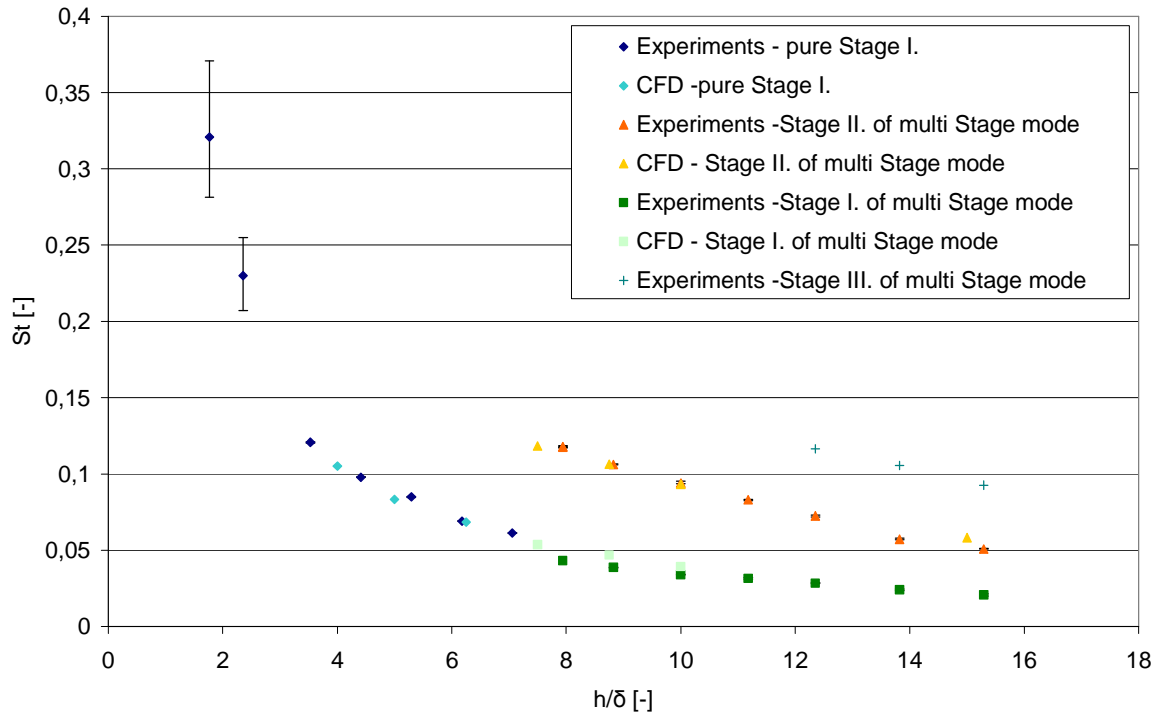
4. ábra: Mérések és szimulációk összehasonlítása. Parabolikus sebességprofil,  $h/\delta = 10$

Hasonló összehasonlítást láthatunk a 4. ábrán parabolikus sebességprofil esetére. Itt a következő megállapításokat tehetjük:

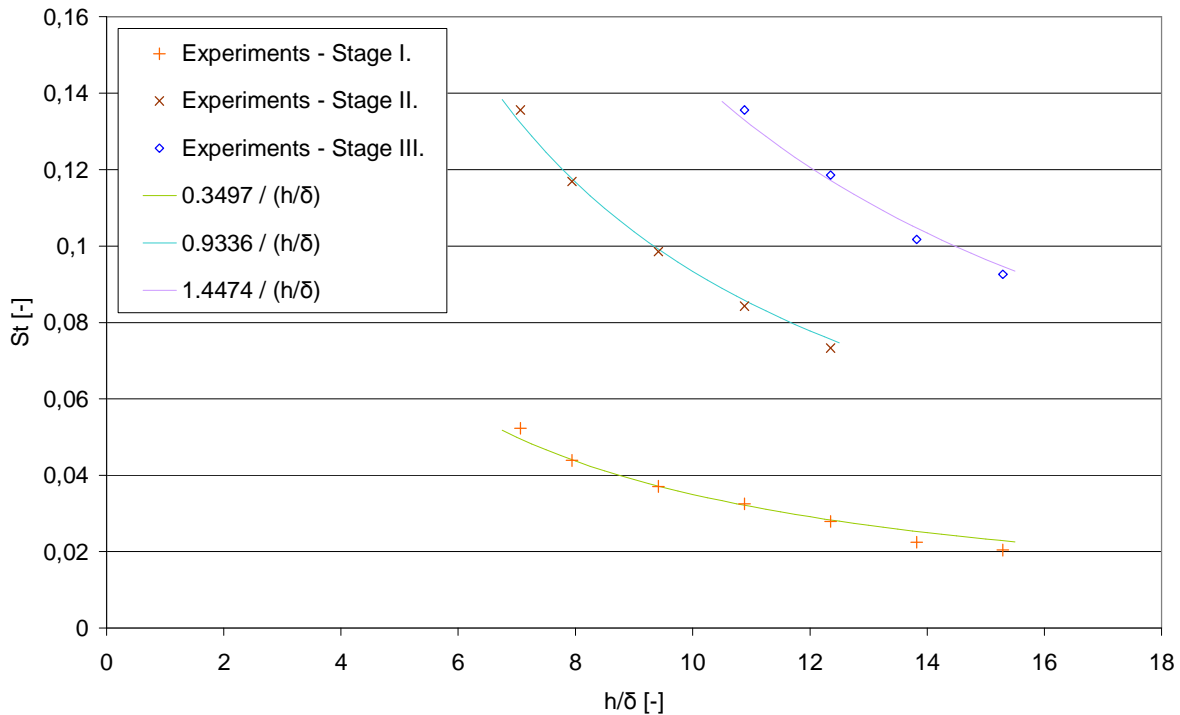
- A kísérletek és a szimulációk közötti numerikus egyezés itt is jó, bár nagyobb Reynolds számra az eltérés nagyobb, mint az egyenletes profil esetén;
- Az egyes módusok megjelenése a szimulációban kicsit alacsonyabb Reynolds szám esetén történik, mint a kísérletekben, kivéve a harmadik módust, ahol, hasonlóan az egyenletes profil esetéhez, jóval magasabb Reynolds számnál;
- A szimulációk reprodukálták a parabolikus konfigurációnak azt az irodalomból ismert tulajdonságát, hogy a magasabb módus megjelenése után, egy rövid átlapolási tartományt követően, az alacsonyabb módus eltűnik, és csak egy tiszta módus van jelen. Ezt a tulajdonságot a kísérletek nem erősítették meg. A kísérletek hasonlóan viselkednek, mint az egyenletes profil esetén, azaz a különböző módusok együtt léteznek. Az eltérés okainak felderítésére tovább folytatjuk a vizsgálatokat;
- Az egyenletes profilhoz és a parabolikus profilhoz tartozó eredményeket összehasonlítva azt tapasztaljuk, hogy ugyanahhoz a Reynolds számhoz 15-25%-al nagyobb Strouhal szám értékek tartoznak a parabolikus esetben, mint az egyenletes profil esetén. Mind az első lengés, mind a magasabb módusok alacsonyabb Reynolds számnál jelentkeznek a parabolikus esetben;
- A lengés rms amplitúdója 35%-al emelkedett az egyenletes profilú esethez képest;
- A kezdeti tranziens a parabolikus esetben kb. fele olyan hosszú, mint az egyenletes esetben;

A fenti pontok egy részére magyarázatot adhat az a tény, hogy az ugyanolyan Reynolds számú parabolikus esetben kb. 20%-al több impulzust és 54%-al több energiát juttatunk a rendszerbe, mint az egyenletes esetben.

A következőkben a Reynolds számot konstans értéken tartjuk és a fúvóka – ék távolságot változtatjuk. Az 5. ábra ismét kitűnő egyezést mutat a kísérletek és a szimulációk között.



5. ábra: Mérések és szimulációk összehasonlítása. Egyenletes sebességprofil,  $Re = 350$



6. ábra: Görbeillesztés mindhárom módus kísérleti eredményeire.  $Re = 400$

A 6. ábra tanúsága szerint a frekvencia a fúvóka-ék távolsággal fordítottan arányos, azaz az (1) összefüggésben az  $n$  kitevő 1. Ezt számos más Reynolds számra, parabolikus esetre, illetve a szimulációkkal is így találtuk, valamint más szerzők nemrégiben megjelent eredményei is megerősítették, s ezzel az irodalomban az utóbbi 20 évben elfogadott  $3/2$ -es hatványt erősen megkérdőjeleztük.

## 2. Áramlástan szimulációk

A szimulációkat az ANSYS CFX kereskedelmi szoftver segítségével végeztük, nagy többségében kétdimenziós modellel. Az eredmények egy jelentős részét már a kísérleti fejezetben prezentáltuk, a kísérletekkel való összehasonlítás során. A kísérleti fejezetben leírt számos következtetés a szimulációkra is érvényes.

A szimulációkat lamináris, összenyomhatatlan folyadék esetére végeztük.

Igen kiterjedt előzetes vizsgálatokat végeztünk, amelyekkel meggyőződünk a későbbi szimulációk megfelelő pontosságáról. Ezek magukba foglalták a megfelelő numerikus rács megtalálását, a megfelelő időlépés kiválasztását, és a szimuláció megfelelő hosszúságának megtalálását (ez utóbbira az FFT frekvenciafelbontása miatt volt szükség). E vizsgálatok melléktermékeként egy analitikus kritériumot hoztunk létre arra, hogy különböző Reynolds-számoknál az állandó diszkretizációs hiba megtartásának érdekében milyen időlépést kell használni. A kritérium szerint állandó abszolút pontossághoz az időlépést a Reynolds szám  $-3/2$  hatványával arányosan kell csökkenteni, azaz a szimulációk a Reynolds szám növelésével egyre hosszabbak lesznek. Állandó relatív pontossághoz viszont elég a Reynolds számmal fordítottan arányosan csökkenteni az időlépést, ami viszont azt jelenti, hogy egy-egy perioduson belül kb. mindig ugyanannyi időlépés kell, ami a szimuláció időtartamát majdnem konstans szinten tartja.

Alacsony Reynolds számnál két-három napig, magas Reynolds számnál két-három hétig (!) is eltartott egy szimuláció.

A szimulációs vizsgálatok első és talán legfontosabb eredménye, hogy tudomásunk szerint mi reprodukáltuk először és egyedülként a kísérletileg már ismert különböző módusok létezését számítógépes szimulációval.

A saját kísérleteinkkel való jó egyezés is igen biztató.

A 7. ábrán látható egy tipikus áramlási kép, amin a periodikus örvényleválás jól megfigyelhető.

Az egyik folyóiratcikkben (Vaik and Paál, 2007) vizsgáltuk a geometria módosításának hatásait, hasonlóan ahhoz, ahogyan ezt a fúvókakészítők teszik. Ez magában foglalja a fúvóka lekerekítését, illetve a fúvóka lecsapását. A kapott eredmények összhangban vannak az irodalommal.

Az ékre ható átlagos erő eloszlását az irodalommal hasonlóan találtuk, az erő támadáspontja viszont máshol van, de ennek helye megdöbbenően stabil, független a Reynolds számtól és a  $h/\delta$  aránytól. Ennek jelentősége az akusztikai dipólus forrás effektív helyének meghatározásában van. Vizsgáltuk a felharmonikusok amplitúdójának térbeli eloszlását is, amik jellegzetes, kezdetben exponenciális, később csökkenő viselkedést mutatnak.

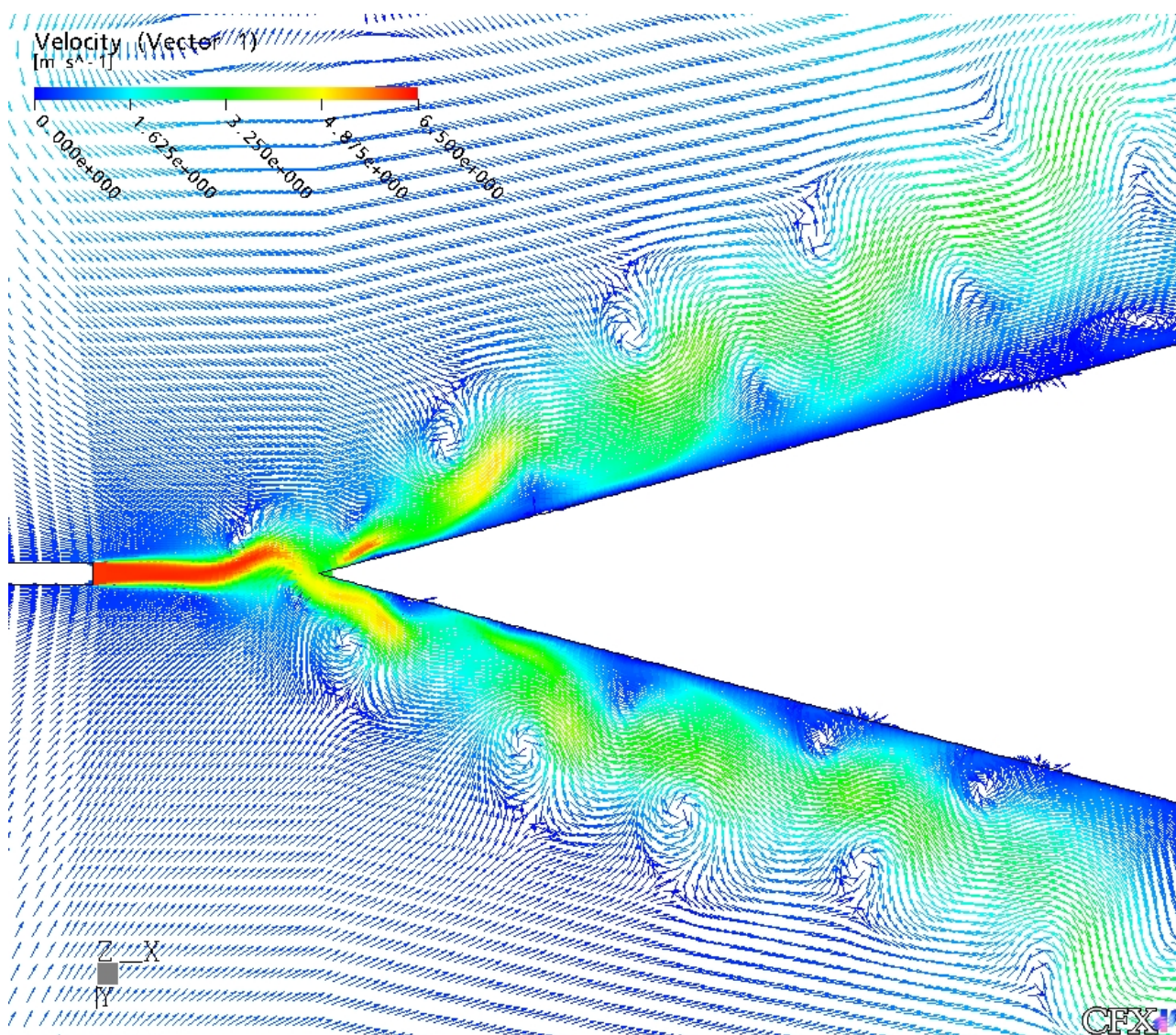
Vizsgáltuk a zavarás terjedési sebességét is az  $x$  koordináta függvényében és azt találtuk, hogy a sebesség az irodalom feltételezéseivel szemben nem konstans, hanem folyamatosan csökken. A fúvóka mellett még a kiömlés sebességével hasonló nagyságrendű és az ékhez érve ennek 35-50%-ára csökken.

## 3. Akusztikai szimulációk

A munka célja az volt, hogy egy kereskedelmi áramlásszimulációs szoftvert összekapcsoljunk egy, az erlangeni egyetemen írt akusztikai szoftverrel. Ezt a munkát közösen végeztük az erlangeni egyetemi munkacsoporttal, részben egy DAAD-MÖB kétoldalú kooperációs szerződés keretében. A kapcsolást kezdetben két dimenzióban, később három dimenzióban, valamint mindkét esetben mind frekvenciatartományban, mind időtartományban elvégeztük. A kapcsolás lépései a következők:

- Az áramlástan szimuláció elvégzése egy kisebb tartományon, finom hálózattal;
- Az akusztikai forrástagok kiszámítása Lighthill elmélete alapján;
- A forrástagok interpolációja a durvább akusztikai hálóra (az akusztikai háló viszont sokkal nagyobb térbeli tartományt fed le);
- Az inhomogén hullámmegyenlet megoldása a hangterjedés meghatározására;





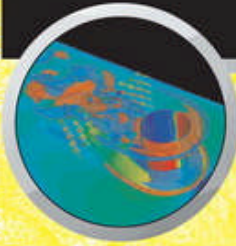
7. ábra Sebességvektorok az élhang lengésének egy kiragadott időpillanatában. A periodikus örvényleválás jól megfigyelhető

A munka során számos technikai nehézséget kellett megoldani, pl. a megfelelő interpolációs módszer kidolgozását. Először egy kereskedelmi interpolációs szoftvert, az MPCCI-t használtuk, később áttértünk egy házilag készített interpolációs szoftverre. Az akusztikai szimulációban keletkező hatalmas mennyiségű adat kezelése szintén sok nehézséget okozott.

A háromdimenziós szimulációk jelenleg is folynak; ezekből nem született még publikáció. A kétdimenziós akusztikai szimulációk viszont szépen visszaadták az élhang várt dipólus iránykarakterisztikáját és eredményeink felkerültek az ANSYS cég aeroakusztikai lehetőségeket reklámozó plakátjára, amelyet a világ minden táján használtak. Ennek alsó felében látszanak a mi eredményeink (8. ábra).

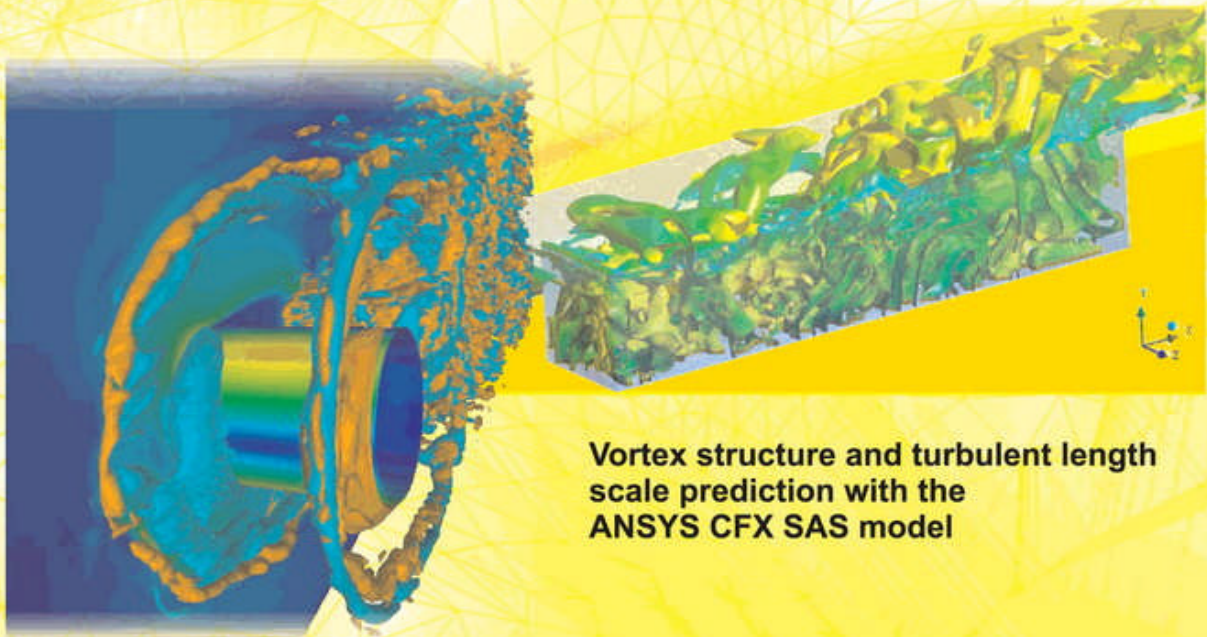
Alul baloldalon szépen látszanak a dipólus hangforrásnak megfelelő hullámfrontok. A közeli tér aszimmetriája az ék ferdeségének a következménye, ez a távoli térben már teljesen eltűnik.



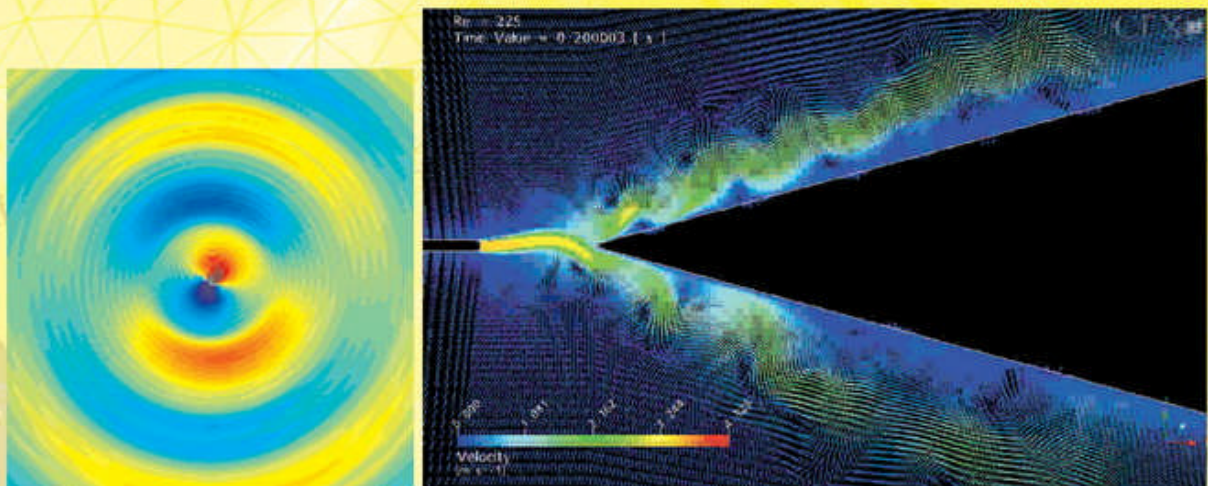


# ANSYS®

## ANSYS CFX and CFS++ for Aeroacoustics



Vortex structure and turbulent length  
scale prediction with the  
ANSYS CFX SAS model



Noise far field prediction with CFS++ based on turbulent sound source  
simulation with ANSYS CFX for the transient flow at an edge

[www.ansys.com](http://www.ansys.com)